

引用格式: DING Jiang, SONG Chaocheng, MA Cui, et al. Monocular Vision Pose Solving Algorithm Based on Feature Circle Target[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0211006

丁江,宋朝成,马翠,等.基于特征圆靶的单目视觉位姿测量算法研究[J].光子学报,2023,52(2):0211006

基于特征圆靶的单目视觉位姿测量算法研究

丁江¹,宋朝成^{1,2},马翠²,何凯²,左启阳²

(1 广西大学 机械工程院, 南宁 530004)

(2 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055)

摘要:为提高基于工业机器人近距离下空间平面位姿的求解精度,分析了由透视畸变引起的圆投影误差的变化规律,以物距与特征圆半径的比值作为衡量圆透视畸变误差的参数依据,提供了不同物距下的精度参考。推导了基于空间圆投影图像的三点相对位姿求解算法。定量的误差分析和实验验证表明,物距与特征圆半径比值在 18 以内像素精度在 0.1~1 像素时,算法精度平均可以达到 0.1°,优于文中其他两种算法。

关键词:测量;机器视觉;空间圆特征;位姿测量;透视投影

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235202.0211006

0 引言

随着工业机器人^[1-2]的应用越来越广泛,基于机械臂的自动锁螺丝机器人^[3],室内喷涂机器人^[4],缺陷检测机器人^[5]等的精度需求也越来越高,其中机械臂与工作平面的相对位姿的准确度往往是最为关键的一环。而圆作为生活中常见的几何特征,往往多出现于各种物体和工件之上。鉴于单目视觉位姿测量^[6]较于双目、多目,具有结构简单,系统运算量低等优势,故研究基于平面圆特征的单目视觉系统下空间平面相对位姿的求解将具有重要意义。

目前空间平面位姿求解主要分为多点约束问题和非点约束问题。前者主要有 FISCHLER J 等^[7]在 1981 年提出的基于点约束的多点透视问题(Perspective n-points Problem, PnP),通过解析法和迭代法等可精确求解目标位姿,计算较为复杂;LEPRIT V 等^[8]提出的高效率多点透视(Efficient Perspective n-points Problem, EPnP)算法在能获得高质量图像的前提下大大提升了 PnP 算法效率;陈鹏等^[9]在 EPnP 算法基础上提出的基于迭代的高效率多点透视(Iterative Efficient Perspective n-points Problem, IEPnP)算法,在对噪声的高鲁棒性下保持了 EPnP 算法的高效率。作为非点约束的基于平面圆特征的位姿测量研究因其靶标制作简易,原理简单,也引起了广大学者的注意。其基于是否考虑空间圆的透视畸变,又可分为考虑透视畸变的类椭圆方法和不考虑透视畸变的椭圆法。如 KABUKA M 和 ARENAS A^[10]把圆投影图视作椭圆,提出了将投影椭圆短径与长径比值来作为目标平面的俯仰角,并通过目标靶面的投影阴影来消除姿态解的二义性。ZHOU Z 等^[11]在正投影的前提下通过圆形标记实现了对物体的三维识别。SHIU Y C 和 AHAMED S^[12]提出了既能处理球形特征,又能处理圆形特征的方法,并给出了封闭解。SAFAEE-RAD R 等^[13]基于圆形特征的三维位置估计推导出了封闭解析解,提供了一种针对球面特征的封闭解析解方法,并做了仿真和实验验证。ZHANG G 和 WEI Z^[14]建立了用于透视投影的椭圆中心位置畸变模型,提高了空间圆的定位精度。何森等^[15]在考虑透视畸变的情况下完成了单目视觉的非接触式飞机舵面角位移标定,但对靶标尺寸精度要求较

基金项目: NSFC-深圳机器人基础研究中心项目(No. U2013204),国家自然科学基金(No. 51905113),广西自然科学基金(No. 2021GXNSFAA220095)

第一作者: 丁江, jding@gxu.edu.cn

通讯作者: 左启阳, qy.zuo@siat.ac.cn

收稿日期: 2022-07-23; **录用日期:** 2022-09-23

<http://www.photon.ac.cn>

高,坐标转换中间误差较大,依赖于准确的距离测算。WANG G等^[16]以更少的条件参数提出并证明了从一个圆和两对平行线的单一图像中恢复相机姿态的可能性。ZHENG Y等^[17]给出了圆的投影方程,在此基础上提出了单目圆位姿估计的闭合形式解,并从几何角度说明了这两种可能解集的合理性以及它们之间的关系。张磊等^[18]设计了空间圆投影仿真模型,并增加了激光测距仪来获取深度信息;魏振忠等^[19]通过圆和共面的直线对,基于欧氏空间中的角度不变量消除了圆特征姿态计算结果的二义性;苗锡奎等^[20]通过引入额外参考点的方式消除了空间圆求解的二义性。LIU L等^[21]在考虑透视畸变的前提下推导了空间圆姿态求解方程,但是对图像采集及处理要求严格,鲁棒性较低。李志宇等^[22]研究出一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法,扩展了线结构传感器测量圆孔位姿的适应性。于长志等^[23]借助排列点激光位移传感器提出了背靠视觉端面对接定位方法,进一步提升了空间圆位姿求解精度。

由于上文所述研究大多涉及较远距离下的空间平面位姿求解,对近距离下的适用性还有待研究。如在目标圆靶大小不变时,近距离下透视投影带来的“近大远小”透视畸变将不得被重视,其主要表现为圆在相机中的成像为一个类椭圆,而不是一个标准椭圆。此时仍然将其投影成像当作椭圆来处理,必然带来相应的误差。本文设计了一种圆形标靶和基于平面圆特征的单目视觉位姿测量算法。在考虑透视畸变的前提下,经过误差分析和实验验证,该算法具有更高的精度,满足近距离测量要求,通过将其和现有算法的配合使用,可以提高空间平面位姿的整体求解精度。

1 靶标的设计和相机成像原理

如图1所示,本文设计了一种可用于求解机械臂末端与目标平面相对位姿的圆形标靶。该标靶主要由一个同心圆环,三个圆以及一个三角形组成。其内部特殊的图案组成,可实现对靶标圆心的准确定位,且在相机光轴与目标平面垂直时仍然可以推导出标靶绕其法向量的旋转角度。因本文主要研究空间平面与相机的相对俯仰角问题,其余问题在此不做叙述。

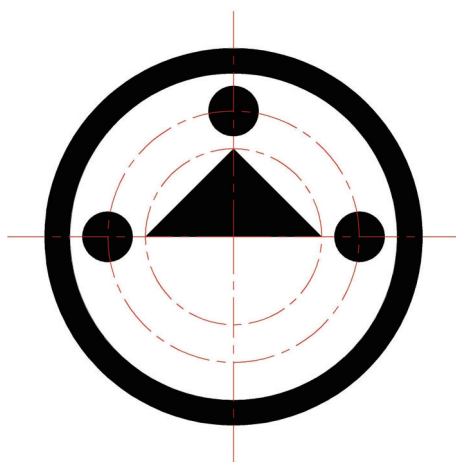


图1 特征圆靶

Fig 1 Characteristic circular target

在单目相机成像原理中,主要涉及三个坐标系。通过右手螺旋定则可建立如图2所示的空间坐标位置关系,包括以相机光心为坐标原点的相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$,与相机坐标系 Z 轴同向, X , Y 轴相互平行的图像坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$,以及位于目标平面上的世界坐标系 $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ 。空间平面与相机的位置关系即变成了相机坐标系与世界坐标系之间的转换关系,在像平面 X , Y 坐标轴完全垂直时,此转换关系可用式(1)表示。

$$Z_c \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \\ 0 \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, Z_c 为相机光心与目标点的垂直距离,即目标的深度值, K 为相机标定获得的内参矩阵, R 和 T 同样由相机标定获得,分别代表旋转矩阵和平移矩阵。经标定后,本文所用相机的内参矩阵和畸变系数分别如

式(2)、(3)所示。式(3)中 k_1, k_2 和 k_3 为径向畸变系数, p_1 和 p_2 为径向畸变系数。此后计算所用图片均已消除畸变。

$$K = \begin{bmatrix} 1.11645670 \times 10^4 & 0 & 2.64247301 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 1.11627533 \times 10^4 & 1.76785848 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[k_1, k_2, k_3, p_1, p_2] = [-1.74714837 \times 10^{-1}, 1.03382620, -4.01663490 \times 10^{-4}, 1.33076036 \times 10^{-3}, -8.40295043 \times 10^{-1}] \quad (3)$$

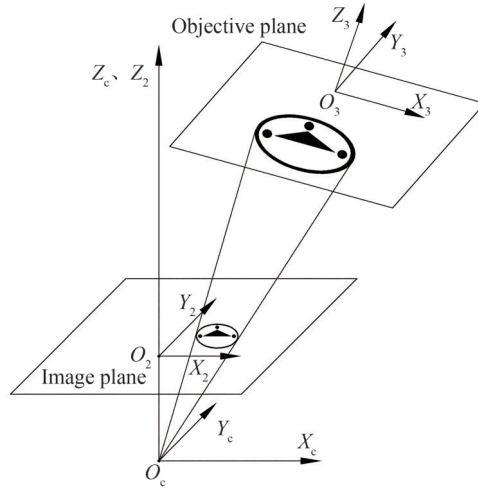


图2 相机成像原理

Fig. 2 Camera imaging principle

2 算法实现

2.1 算法原理

基于相机成像中的透视投影原理,建立如图3所示的投影关系示意图。为了方便理解和计算,本文取目标中心与相机光轴共线时的相对位置来对算法进行说明和仿真实验。

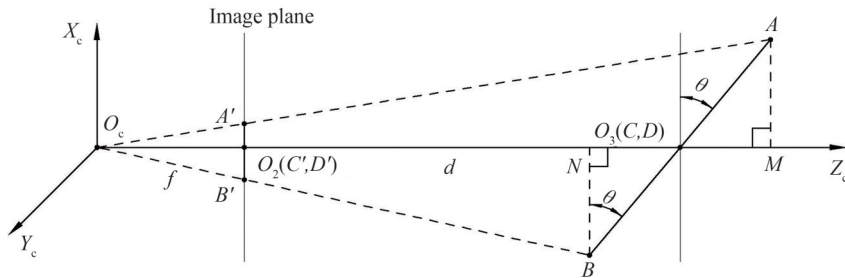


图3 透视投影原理

Fig.3 perspective projection principle

图3中相机坐标系原点 O_c 与图像平面中心 O_2 的距离为焦距 f ,相机坐标系原点 O_c 与目标圆靶中心 O_3 的距离为 d ,即物距。 AB 长度为目标圆靶的直径 $2r$ 。从 AB 两点向 Z_c 引垂线分别交 Z_c 于点 M, N 。由三角形相似关系 $\Delta O_c O_2 B' \sim \Delta O_c N B$ 和 $\Delta O_c O_2 A' \sim \Delta O_c M A$ 可以得到

$$\frac{a_1}{r \times \cos \theta} = \frac{f}{d + r \sin \theta} \quad (4)$$

$$\frac{a_2}{r \times \cos \theta} = \frac{f}{d - r \sin \theta} \quad (5)$$

式中, a_1, a_2 分别为目标圆成像中类椭圆短轴的两部分长度, 且 $a_1 < a_2$, 即图3中 O_2A' 与 O_2B' 的长度, θ 即为目标圆靶的俯仰角度。圆靶的投影示意图如图4所示。

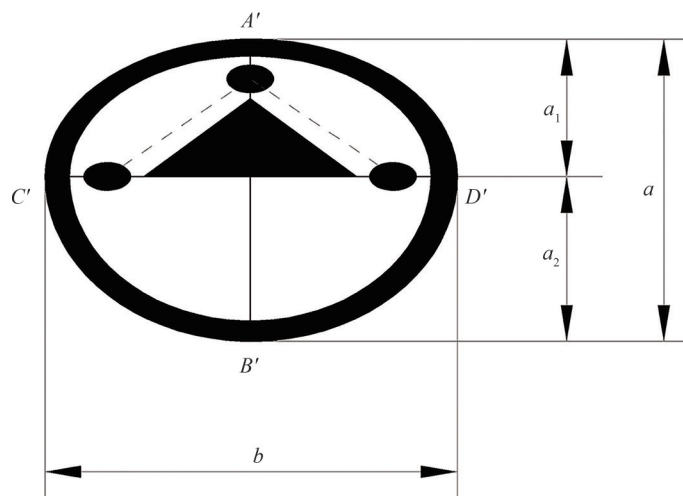


图4 圆靶投影示意图

Fig.4 Schematic projection of a circular target

再根据三角形角度关系

$$\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1 \quad (6)$$

联立式(4)~(6)可以得到以远点(点A)和近点(点B)的结果 θ 和 θ' 分别为

$$\theta = \arcsin \left(\frac{-a_1^2 d \pm f \sqrt{(a_1 r)^2 + (f r)^2 - (a_1 d)^2}}{r(a_1^2 + f^2)} \right) \quad (7)$$

$$\theta' = \arcsin \left(\frac{a_2^2 d \pm f \sqrt{(a_2 r)^2 + (f r)^2 - (a_2 d)^2}}{r(a_2^2 + f^2)} \right) \quad (8)$$

当目标圆靶与相机光轴 $O_c Z_c$ 垂直时有

$$\frac{b}{2r} = \frac{f}{d} \quad (9)$$

式中, b 为该物距下目标圆靶直径所对应的其在图像坐标系中的长度, 单位 mm, 为消除物距测量和标靶制作误差, 将式(9)分别代入式(7), 式(8)可得

$$\theta = \arcsin \left(\frac{-2fa_1^2 + 2f^2 \sqrt{\left(\frac{a_1 b}{2f}\right)^2 + \frac{b^2}{4} - a_1^2}}{b(a_1^2 + f^2)} \right) \quad (10)$$

$$\theta' = \arcsin \left(\frac{2fa_2^2 \pm 2f^2 \sqrt{\left(\frac{a_2 b}{2f}\right)^2 + \frac{b^2}{4} - a_2^2}}{b(a_2^2 + f^2)} \right) \quad (11)$$

此时, 俯仰角 θ 的计算只同图4中的 a_1, b 以及定值 f 相关。因为目标圆靶与相机坐标系所在平面 $X_c Y_c Z_c$ 的夹角 θ 范围在 $0 \sim 90^\circ$, 所以角 θ 的正弦值必然为正。由式(11)可以看出, 当以近点(点B')来计算时, 可能存在两个正解。这在实际测量中, 由于相机装配误差和成像的像素误差等的存在, 这个现象将更加普遍, 这便出现了同目标圆成椭圆像时的二义性相似的问题。所以本文采用的是三点算法, 即目标圆成像中类椭圆长径的两个端点(点C'和点D')和短径的远点(点A'), 此处的远点仅代表短径的短边部分的端点。

为了进一步说明特征点的选取依据, 联立式(4)、(5)可得

$$\begin{cases} a_1 = \frac{f \cos \theta}{\frac{d}{r} + \sin \theta} & 0 \leq \theta \leq 90^\circ \\ a_2 = \frac{f \cos \theta}{\frac{d}{r} - \sin \theta} & 0 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (12)$$

取相机焦距 f 为25 mm,式(12)可用图5表示如下。从图5中的等高线也可以看出当目标圆靶直径确定时,随着物距的减小, a_1 由 θ 改变引起的长度变化相对 a_2 更加显著,特别是 θ 较小时更为明显。这对角度变化的测量更加有利。

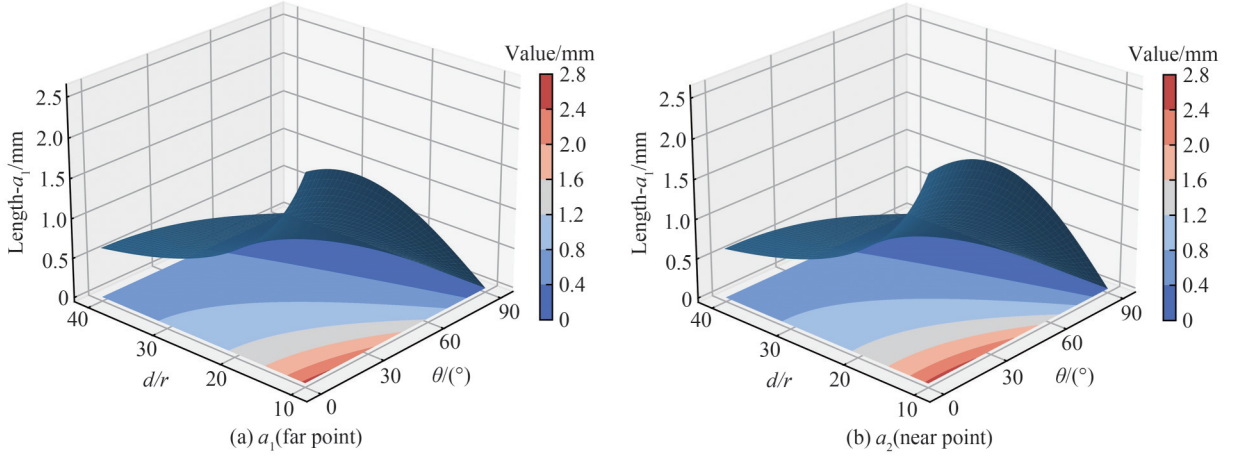


图5 透视畸变下 a_1 和 a_2 长度的变化

Fig.5 Variation of a_1 and a_2 lengths under perspective distortion

在对图形进行二值化,去噪,消除尖锐凸点和断点的开闭运算等形态学处理后,通过canny^[24]算子检测边缘并基于文献[25]中的二值化图案轮廓提取方法来提取圆靶外圆轮廓,且后续关键点的提取以及椭圆拟合均是基于此轮廓的计算。通过计算可以得出轮廓中距离最远的像素点对 $C'(u_1, v_1)$ 和 $D'(u_2, v_2)$,以 $C'D'$ 连线(式(13))为基准,统计直线两侧轮廓点集的大小。根据透视投影中近大远小的原理,点集相对较小的即为远点所在轮廓。再通过求解此点集中距离直线 $C'D'$ 最远的点即为所求远点 (u_0, v_0) ,此点在图4中表现为点 A' 。进而由式(10)求出目标圆靶所在平面相对于相机的俯仰角大小。最后借助点与直线位置关系判别式(式(14)),以远点位于直线 $C'D'$ 上侧还是下侧作为俯仰角的方向。目标平面的偏转角则由直线 $C'D'$ 的斜率求得,至此即可唯一确定目标平面的旋转姿态。

$$v - v_1 = \frac{v_2 - v_1}{u_2 - u_1} \cdot (u - u_1) \quad (13)$$

$$\begin{cases} v_0 - v_1 - \frac{v_2 - v_1}{u_2 - u_1} \cdot (u_0 - u_1) \geq 0, \Rightarrow \theta \geq 0 \\ v_0 - v_1 - \frac{v_2 - v_1}{u_2 - u_1} \cdot (u_0 - u_1) \leq 0, \Rightarrow \theta \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

2.2 其他算法

本文选择目前较为主流的椭圆法(算法1),以及同样考虑透视畸变的另一类椭圆方法(算法2)。

算法1因不考虑透视畸变,故一般应用于较远距离下空间平面的位姿求解,即默认 $d/r \gg \sin \theta$,此时式(12)将被改写成

$$\frac{a}{2} = a_1 = a_2 = \frac{f \cdot \cos \theta}{d/r} \left(\frac{d}{r} \gg \sin \theta \right) \quad (15)$$

联立式(9)和式(15)可得

$$\theta = \arccos\left(\frac{a}{b}\right) \quad (16)$$

算法1是目前主流的基于特征圆的空间平面位姿求解依据。值得注意的是 d/r 这个尺度什么时候可以判定为远大于 $\sin\theta$,并没有明确的研究数据参考。为此本文取相机焦距 f 为25 mm,目标圆靶半径 r 为15 mm,相机像元尺寸为 $2.4\ \mu\text{m}$ 。不考虑像元尺寸在成像平面 XY 两个维度的尺度偏差,并将透视畸变下目标圆靶的倾斜角度作为真值,并以最大误差来代表每一个 d/r 值下该算法的绝对误差,结果如图6所示。在将 $d/r \leq 16.9$ 视为近距离时,椭圆法的精度为 1° ,在 $16.9 \leq d/r \leq 53.5$ 时精度可以提升到 0.1° 。显然,这对于工业相机的近距离精密测量来说是不可忽视的。此外椭圆法的解集存在二义性^[7-8],需要增加外设和算法来消除。其中最常用的是通过求解成像椭圆方程,获得其椭圆锥面方程,进而反推出目标圆靶所在平面的平面方程,最后确定唯一解。整个算法需要知道目标圆靶的尺寸 r ,在 r 未知时,主要通过式(9)来实现对目标圆靶尺寸半径 r 的测量,对于机械臂平台来说,可以通过机械臂在坐标轴方向的两次平移来实现单目视觉下深度信息 d 的获取。

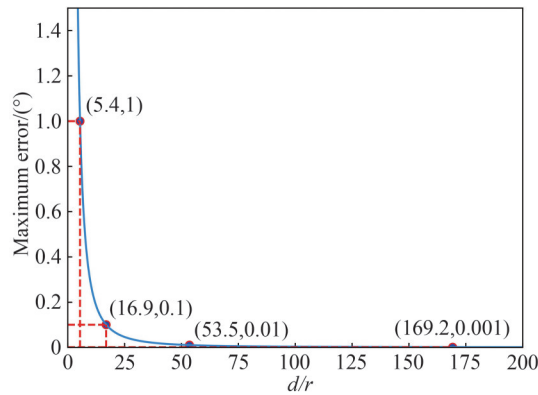


图6 椭圆法绝对误差变化

Fig.6 The variation of absolute error accuracy of ellipse method

算法2可由式(4)和式(5)联立得到如式(19)所示关系,由 a_1 与 a_2 大小关系,可直接求得带符号的角 θ 值,并通过 θ 的正负来判断角 θ 方向。此方法依赖于对类椭圆短径两部分的求解,在目标圆靶与相机光轴共面时 a_1 与 a_2 的和为0,方程无解,导致大角度测量时精度将受影响。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2}\right) \cdot \frac{d}{r} = \arcsin\left(\frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2}\right) \cdot \frac{2f}{b} \quad (17)$$

3 误差仿真计算

由于沿摄像机光轴方向上的位移测量精度一般远低于垂直光轴方向上的位移测量精度^[26],在相对位姿测量中主要表现为俯仰角测量精度小于偏转角测量精度,且不同算法之间的区别主要为空间圆成像中短轴长度的测量。因此为了方便比较三种方法的差异,本文仅计算误差较大的空间平面俯仰角 θ 值的大小,其方向的判定不影响对精度的验证。在基于工业相机和特征标靶的单目视觉近距离测量中,图像的处理和识别是影响整个系统精度的主要因素。外界环境如光照、标靶表面环境等往往表现为图像采集质量的优劣,相机及外部设备的安装精度虽然难以避免,但本文求解的是目标平面与相机坐标系的相对姿态,故机械安装误差并不影响求解精度。在以像素为单位的视觉测量中,对目标像素尺寸的处理与计数直接关乎目标在空间位置的物理尺度,考虑到近距离测量相对远距离图像质量较高,故此处分别取0.1个和1个像素做误差干扰分析。

因为像素测量的不确定性在符号相反的时候表现最强烈,且不同算法均涉及对目标圆靶成像的长径和短径的测量,故以 θ_0 为真值时可得算法1的误差模型为

$$e_0 = \left| \theta_0 - \arccos\left(\frac{b \cdot \cos \theta_0 \pm 2n \times L_{\text{pixel}}}{b \pm 2n \times L_{\text{pixel}}}\right) \right| \quad (18)$$

本文算法和算法2的误差模型 e_1, e_2 为

$$\begin{cases} e_1 = \left| \theta_0 - \arcsin \left(\frac{-f(a_1 \mp n \times L_{\text{pixel}})^2 + f^2 \sqrt{\left(\frac{(a_1 \mp n \times L_{\text{pixel}})b}{2f} \right)^2 + \left(\frac{b}{2} \pm n \times L_{\text{pixel}} \right)^2 - (a_1 \mp n \times L_{\text{pixel}})^2}}{\left(\frac{b}{2} \pm n \times L_{\text{pixel}} \right) \left((a_1 \mp n \times L_{\text{pixel}})^2 + f^2 \right)} \right) \right| \\ e_2 = \left| \theta_0 - \arcsin \left(\frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2 \pm (2n \times L_{\text{pixel}})} \right) \cdot \frac{2f}{b \pm 2n \times L_{\text{pixel}}} \right| \quad (\theta_0 \neq 90^\circ) \end{cases} \quad (19)$$

式中, n 为误差像素个数, L_{pixel} 为相机的像元尺寸, a_1, a_2 由 θ_0 代入式(4)和式(5)得到。

本文第三节实验部分主要涉及 $d=138.8 \text{ mm}$, $d=175.0 \text{ mm}$, $d=266.2 \text{ mm}$ 三个不同物距下的计算, 此处为与后续实验部分贴合, 分别仿真计算了 $n=1$ 和 $n=0.1$ 时三个 d/r 值下的误差, 结果如图7所示。

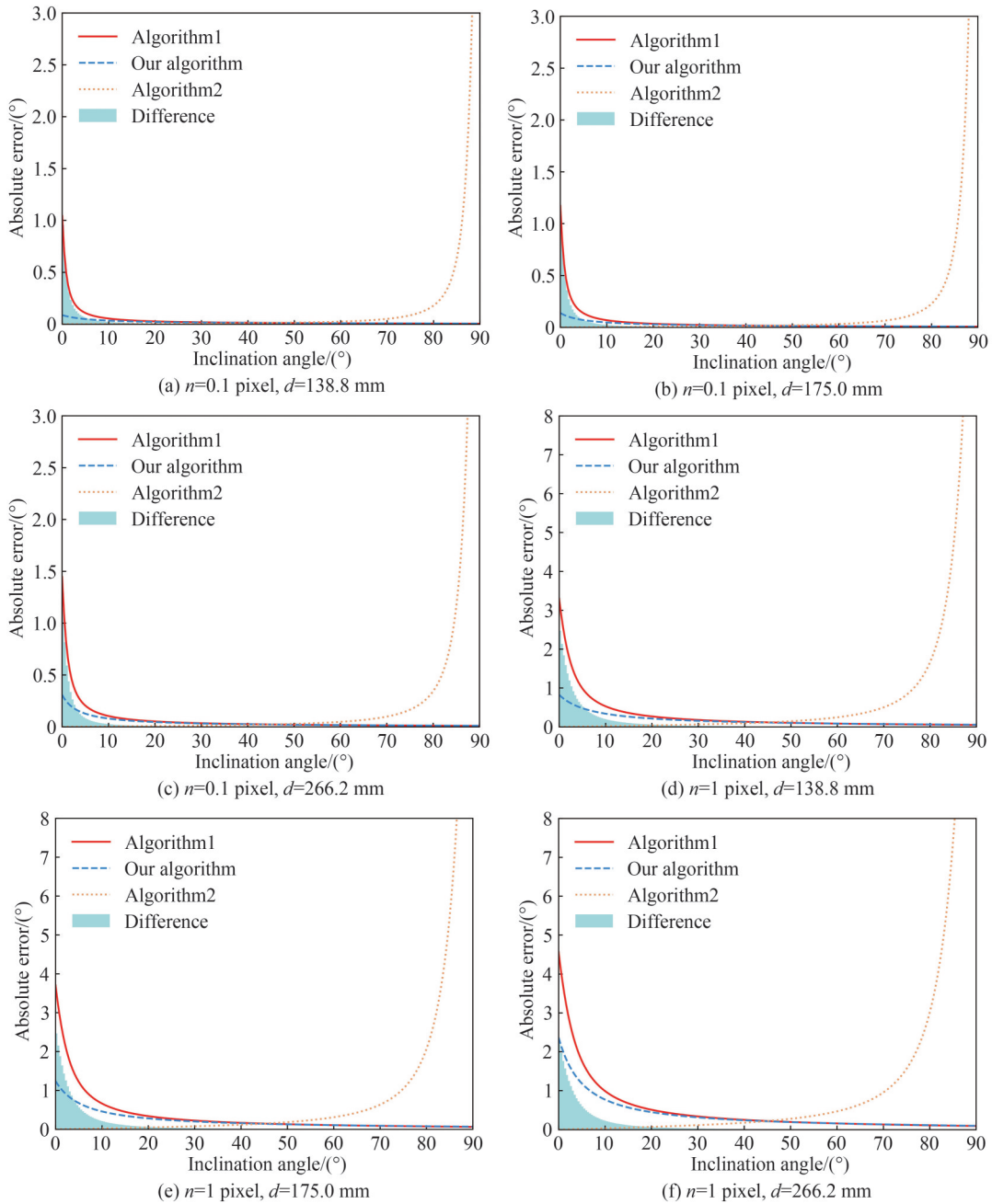


图7 不同算法的绝对误差变化($r=15 \text{ mm}$)

Fig.7 Absolute error variation of different algorithms ($r=15 \text{ mm}$)

从图7中可以看出,随着距离和误差像素的增加,三种方法的误差大小均出现了增加,其中算法1的误差变化与文献[6]中的趋势一致,说明本文误差分析方式的正确性。值得注意的是,本文算法随着物距增加,其误差曲线逐渐接近算法1,两者的差值由图中的阴影部分表示。本文算法与算法1的误差曲线主要表现为随着角度的增加逐渐减小的趋势,且误差在 20° 以内变化最为显著;算法2则正好相反,其误差在 $70^\circ\sim 90^\circ$ 变化最为显著。从图7综合来看,相对于其他两种方法,算法2误差变化幅度均较大。

4 实验验证

由于误差仿真是在圆投影图像中长短轴同时发生等量像素误差时的较为理想状态下的计算,为了能进一步探究三种算法的差别以及验证误差仿真计算的正确性,本文进行了相关实验。实验平台如图8所示,主要包括用于产生相对转角姿态的机械臂以及装配在其上的用于进行图像采集的工业相机,环形光源,视觉实验架,圆点相机标定板,特征圆靶,待测平板等。所用设备参数如表1所示。



图8 空间平面位姿测量实验平台
Fig.8 Experimental platform of spatial plane pose measurement

表1 主要设备
Table 1 Main equipment

Equipment name	Model	Precision parameter	Quantity
Industrial robot	ABB IRB1200-7/0.7	Repositioning accuracy 0.02 mm	1
Industry camera	HIKVISION MV-CE200-10GM 20 million pixels static black-and-white camera	Resolution $5\,472 \times 3\,648$; Pixel dimension $2.4\ \mu\text{m} \times 2.4\ \mu\text{m}$	1
Lens	HIKVISION MVL-KF2528M-12MP (neutral medium)	Fixed focus 25 mm;manual aperture; 12 million pixels;FA lens;field of view (D-H-V): $37.6^\circ\text{-}30.4^\circ\text{-}23^\circ$	1
Adjustable ring light source	JL-FLA-AR12060	48 V/624 W	1
Lighting controller	JL-APR24	—	1
Calibration board	7×7	50 mm×50 mm;±0.001 mm	1

相机成像中的透视畸变会给目标圆定位带来误差,从而给本文基于相机正对目标圆靶这一前提下的计算造成影响。为保证初始位置相机光轴与目标圆靶中心共线,参考文献[14]和文献[27]中的方法预调节,以降低圆靶定位不准带来的误差。

如图9所示,图中 θ_h 和 θ_v 分别为相机水平视场角和垂直视场角,成像区域中的圆为目标圆靶。我们发现

不同物距下,相机成像区域不同,圆靶在成像区域中的占比也不同。在综合考虑所用相机景深和像元精度,并保证实验过程中相机成像始终可以包含标靶对象的前提下,本文物距最小为 138 mm,最大为 264 mm,同时取实验平台的设计工作距离 174 mm。已知目标圆靶尺寸 $r=15$ mm,三个物距与圆靶半径的比值由图 6 可知,满足近距离测量的应用。

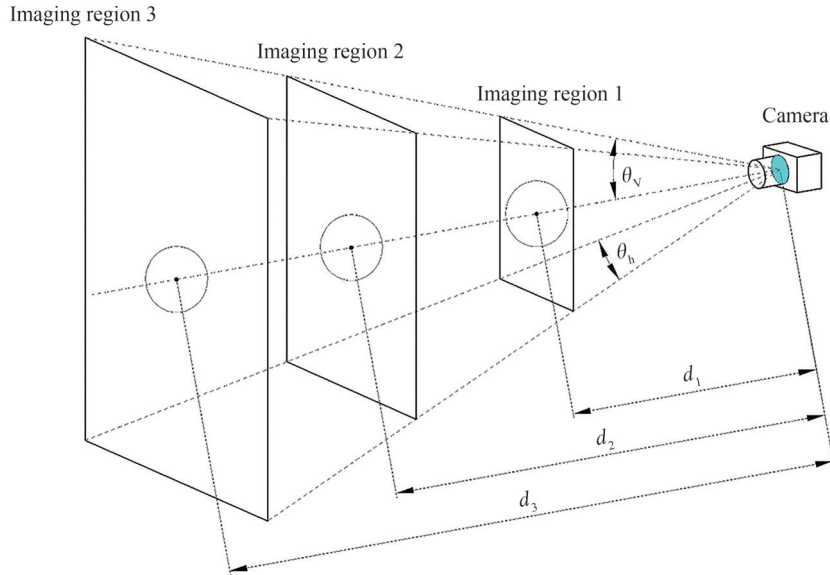


图 9 不同物距下相机的成像区域

Fig. 9 Imaging region of camera at different object distances

实验过程中,以相机为工具设置机械臂的工具坐标系,并调节机械臂使其工具坐标系原点落在待测平面的圆靶中心。圆定位以及机械臂手眼坐标转换均有相关研究,本文在此不做叙述。为保证初始位置相机光轴垂直于待测平面,即待测平面俯仰角为 0° ,可通过圆点标定板的位姿来调整。接着操作机械臂示教器进行重定位操作,控制机械臂以工具坐标原点为旋转中心,以工具坐标系 X 轴(或 Y 轴)做定轴转动,每转动 1° ,相机分别采集一张特征圆靶图片和圆点标定板图片。当物距较近视野较小无法同时获得两张图片时,可微调机械臂沿工具坐标系 X 轴(或 Y 轴)移动之后反向复位来获得同一旋转姿态下特征圆靶和标定板的图片。因为越接近 90° ,光源辐射面积减小以及相机景深的影响,图片质量将难以保证。故本文为保证始终获取到较高质量的图片,限制机械臂转角在 $0^\circ\sim 85^\circ$ 范围内。每个物距下,通过光源调节器适时地调节光源亮度并手动打光,在不同方向和强度的光照下反复测量十次,其测试物距分别为 138 mm, 174 mm, 264 mm, 共三组数据。通过将每个俯仰角下标定板在相机中的十次位姿的均值作为该位置待测平面俯仰角的真值,并以此计算各方法的绝对误差。每组数据中测得的物距均值作为改组数据的 d 值。再以每 10° 为一组,取其绝对误差的均值及标准差做误差棒,实验结果如图 10 所示。

结合图 7,可以确定本文实验中的像素精度在 0.1~1 个像素之间。进一步观察图 10 可以得出:

1) $0^\circ\sim 30^\circ$ 时,相对于算法 1,本文算法与算法 2 的误差更小;此区间仿真结果中误差的增大表现为实验中误差波动的增加;随着俯仰角的减小,圆靶的畸变误差降低,测量误差变大,故三种算法的结果误差均逐渐增大且波动加剧;三种算法误差均从接近 0 开始,是因为本实验以相对俯仰角 0° 为初值,俯仰角较小时,待测平面与相机光轴接近相对垂直姿态,光源辐射面积更大、更均匀,其图像获取精度更高;对于图 10 (a)~图 10 (c) 中的曲线与仿真结果略有差异,主要是实际测量受限于硬件设备、光照、标靶精度等客观因素,而仿真基于的是像素误差呈对称分布时的最大化数值计算的。

2) $30^\circ\sim 50^\circ$ 时,三种算法误差降低的趋势均趋向平缓,且能保持较高的精度;不同物距下各算法的绝对误差变化与上节的误差仿真计算曲线相似。

3) $50^\circ\sim 90^\circ$ 时,本文算法与算法 1 的误差进一步降低,且逐渐趋于平缓;三种算法得到的实验结果与仿真计算曲线相似;从图 10 (e)~(f) 的误差棒可以看出,算法 2 因受累积误差影响,相较于与其他两种算法,其

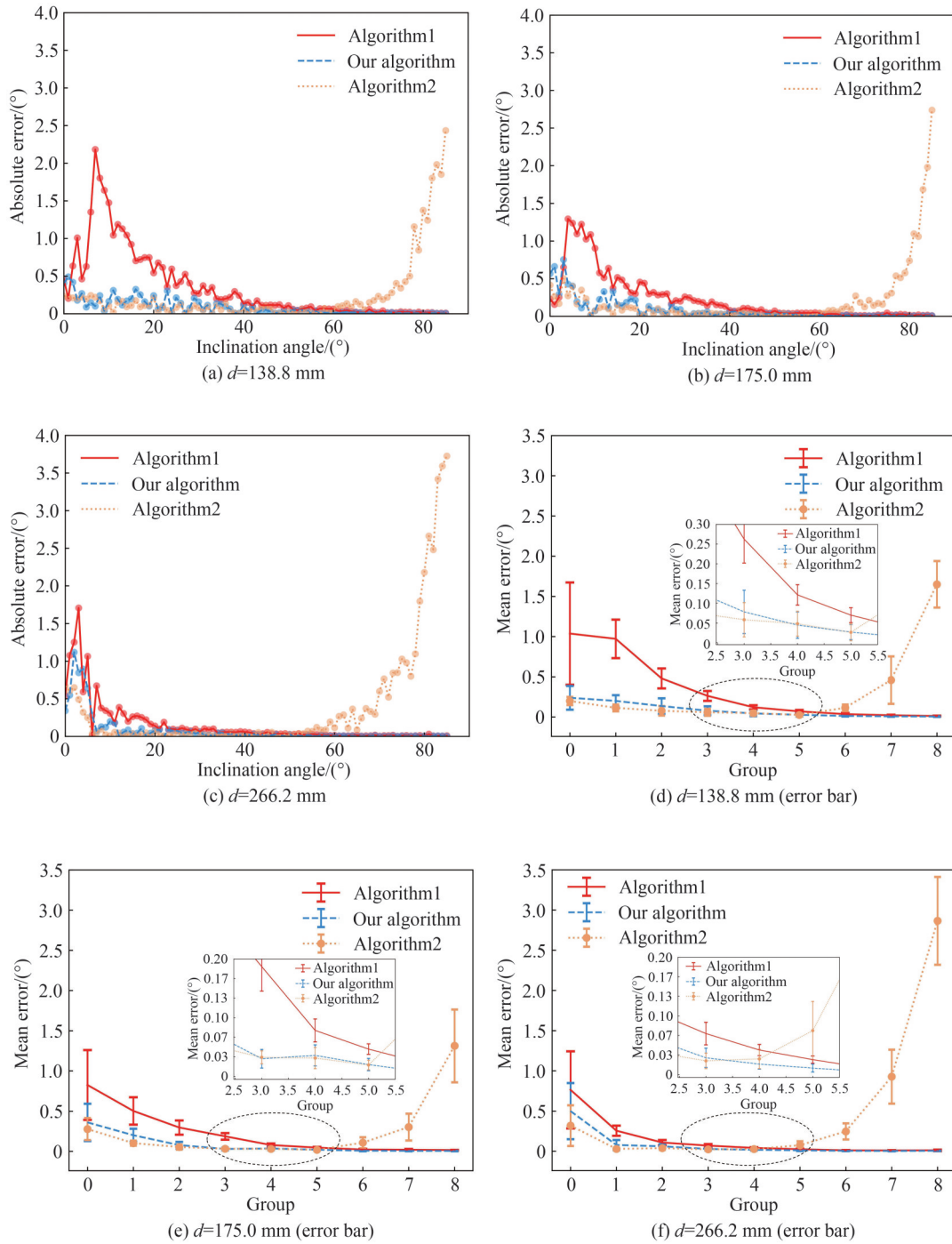


图10 不同算法绝对误差的实验结果($r=15\text{ mm}$)

Fig. 10 Experiments of absolute error based on different algorithms ($r=15\text{ mm}$)

误差大小和波动均逐渐增加;随着物距增加,算法2误差开始增大的起点角度越来越小。

为比较三种算法的整体误差,统计分析了各组数据结果,如表2所示。由表2数据可得,本文算法在三种预设条件下,平均精度均可以精确到 0.1° ,且数据波动均最小。

表2 三种算法统计结果($r=15\text{ mm}$)
Table 2 Results of three algorithms ($r=15\text{ mm}$)

Object distance/ mm	d/r	Algorithm	Maximum error/ (°)	Minimum error/ (°)	Mean value ($0^\circ\sim 85^\circ$)/(°)	Quadratic mean deviation ($0^\circ\sim 85^\circ$)/(°)	Precision/ (°)
138.8	9.25	Algorithm1	2.182 3	0.008 4	0.350	0.454	1
		Our algorithm	0.491 8	0.002 1	0.087	0.108	0.1
		Algorithm2	2.433 0	0.001 3	0.252	0.462	1
175.0	11.67	Algorithm1	1.294 4	0.006 7	0.231	0.312	1
		Our algorithm	0.752 2	0.000 2	0.086	0.144	0.1
		Algorithm2	2.738 1	0.002 0	0.216	0.426	1
266.2	17.75	Algorithm1	1.252 6	0.002 8	0.150	0.287	1
		Our algorithm	1.118 8	0.000 2	0.082	0.196	0.1
		Algorithm2	3.724 6	0.001 0	0.406	0.796	1

5 结论

以基于机械臂的单目视觉系统为平台,研究了近距离测量时由特征圆靶来求解空间平面姿态角的问题,主要涉及空间平面姿态中俯仰角大小的测量,在考虑透视畸变的前提下,通过透视投影原理提出了三点求解空间平面俯仰角的算法,与本文中同样考虑透视畸变的算法2相比,参数更少;与其他算法相比,在对图像进行去噪、形态学处理后,本文算法拥有更高的精度,误差在 $0.1\sim 1$ 像素时,可以精确到 0.1° ;在保证目标圆靶位于图像中心时,目标圆靶尺寸不直接参与本文算法计算,可有效避免靶标制作精度带来的误差;根据主流的不考虑透视畸变的椭圆算法(算法1)的固有误差变化曲线,相机物距与目标圆靶半径的比值在大于17时可近似忽略透视畸变带来的算法误差。下一步将进行更多环境下的实验测量,引入亚像素来提升算法的精度,并研究误差变化,同时优化算法,以提升鲁棒性和检测效率。

参考文献

- [1] SUN Lining, XU Hui, WANG Zhenhua, et al. Review on key common technologies for intelligent applications of industrial robots[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(2): 211-219+406.
孙立宁, 许辉, 王振华, 等. 工业机器人智能化应用关键共性技术综述[J]. 振动. 测试与诊断, 2021, 41(2): 211-219+406.
- [2] KONG Lingsheng, CUI Xining, GUO Junguang, et al. An accurate bin-picking system using temporal encoded structured light sensor [J]. Journal of Integration Technology, 2020, 9(2): 38-49.
孔令升, 崔西宁, 郭俊广, 等. 基于时域编码结构光的高精度三维视觉引导抓取系统研究[J]. 集成技术, 2020, 9(2): 38-49.
- [3] ZENG Xianglin, TUO Xianguo, PENG Yingjie, et al. Design of six-axis auto-locking screw robot[J]. Combined Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2021, 63(4): 10-13+18.
曾祥林, 庾先国, 彭英杰, 等. 六轴自动锁附螺丝机器人设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 63(4): 10-13+18.
- [4] HONG Kailin, CAO Jiangtao, JI Xiaofei. Indoor window detection of autonomous spraying robot based on improved CenterNet network[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2021, 16(3): 425-432.
洪恺临, 曹江涛, 姬晓飞. 改进 Center-Net 网络的自主喷涂机器人室内窗户检测[J]. 智能系统学报, 2021, 16(3): 425-432.
- [5] ZHAO Langyue, WU Yiquan. Research progress of surface defect detection methods based on machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 198-219.
赵朗月, 吴一全. 基于机器视觉的表面缺陷检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 198-219.
- [6] LAO Dabao, ZAHNG Huijuan, XIONG Zhi. Automatic measurement method of attitude based on monocular vision[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 165-171.
劳达宝, 张慧娟, 熊芝, 等. 基于单目视觉的姿态自动测量方法[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 165-171.
- [7] FISCHER J, EICHLER M, BARTZ D, et al. Model-based hybrid tracking for medical augmented reality[C]. Proceedings of the 12th Eurographics Symposium on Virtual Environments, 2006: 71-80.
- [8] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. Epnp: an accurate o(n) solution to the pnp problem[J]. International

- Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [9] CHEN Peng, WANG Chenxiao. IEPNP: An iterative camera pose estimation algorithm based on EPnP[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 138-144.
陈鹏, 王晨骁. IEPnP: 一种基于 EPnP 的相机位姿迭代估计算法[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 138-144.
- [10] KABUKA M, ARENAS A. Position verification of a mobile robot using standard pattern[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(6): 505-516.
- [11] ZHOU Z, SMITH K C, BENHABIB B, et al. Morphological skeleton transforms for determining position and orientation of pre-marked objects[C]. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, IEEE, 1989: 301-305.
- [12] SHIU Y C, AHAMED S. 3D location of circular and spherical features by monocular model-based vision[C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 1989: 576-581.
- [13] SAFAEE-RAD R, TCHOUKANOV I, SMITH K C, et al. Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(5): 624-640.
- [14] ZHANG G, WEI Z. A position-distortion model of ellipse centre for perspective projection[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(8): 1420-1426.
- [15] HE Sen, HOU Honglu, WANG Yao. The calibration technology of the angular rotation of airplane rudders based on characteristic circle in monocular vision[J]. Optical Technique, 2006, 32(4): 524-526.
何森, 侯宏录, 王尧. 基于特征圆单目视觉的飞机舵面角位移标定技术[J]. 光学技术, 2006, 32(4): 524-526.
- [16] WANG G, WU Q M, JI Z. Pose estimation from circle or parallel lines in a single image[C]. Asian Conference on Computer Vision. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007: 363-372.
- [17] ZHENG Y, MA W, LIU Y. Another way of looking at monocular circle pose estimation[C]. 2008 15th IEEE International Conference on Image Processing, IEEE, 2008: 861-864.
- [18] ZHANG Lei, XU Kejun, ZHAO Rui, et al. Improvement of position and orientation measurement algorithm of monocular vision based on circle features[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Sciences, 2009, 32(11): 1669-1673.
张磊, 徐科军, 赵锐, 等. 一种基于圆特征的单目视觉位姿测量算法的改进[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32(11): 1669-1673.
- [19] WEI Zhenzhong, ZHAO Zheng, ZHANG Guangjun. Solution of duality in pose estimation of single circle using Euclidean angular constraint[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 685-691.
魏振忠, 赵征, 张广军. 空间圆姿态识别二义性的角度约束消除[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 685-691.
- [20] MIAO Xikui, ZHU Feng, DING Qinghai, et al. Monocular vision pose measurement based on docking ring component [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 123-131.
苗锡奎, 朱枫, 丁庆海, 等. 基于星箭对接环部件的飞行器单目视觉位姿测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 123-131.
- [21] LIU L, ZHAO Z M. A novel image analysis method for rotational motion of circular feature based on perspective projection [J]. The Imaging Science Journal, 2015, 63(5): 252-262.
- [22] LI Zhiyu, LIN Jiarui, SUN Yanbiao, et al. A method for measuring circular pose based on line structured light sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 40(15): 105-114.
李志宇, 林嘉睿, 孙岩标, 等. 一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 105-114.
- [23] YU Changzhi, ZHANG Lianxin, SUN Pengfei. Normal constraint based positioning method with back against vision for butt-joint assembly[J/OL]. Computer Engineering: 1-14[2022-06-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1289.TP.20211130.0941.002.html>.
于长志, 张连新, 孙鹏飞, 等. 基于法向约束的背靠视觉端面对接定位方法[J/OL]. 计算机工程: 1-14[2022-06-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1289.TP.20211130.0941.002.html>.
- [24] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [25] SUZUKI S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.
- [26] CHAO Zhichao, FU Sihua, JIANG Guangwen, et al. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 93-99.
晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 93-99.
- [27] FAN Shenghong, HUANG Guiping, CHEN Jihua, et al. Subpixel accuracy artificial target location using canny operator [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2006, 24(1): 76-78.
范生宏, 黄桂平, 陈继华, 等. Canny算子对人工标志中心的亚像素精度定位[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 24(1): 76-78.

Monocular Vision Pose Solving Algorithm Based on Feature Circle Target

DING Jiang¹, SONG Chaocheng^{1,2}, MA Cui², HE Kai², ZUO Qiyang²

(1 College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(2 Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Industrial robots are gradually applied in the field of precision measurement on account of its high degree of freedom and high precision of repetitive positioning. In order to achieve autonomous movement and complete specified actions, industrial robots often need to carry out precise motion control and precise measurement of the physical scale of the target. The former is accompanied by the development of the manipulator, and its control algorithm has become mature, while the latter has an increasingly high demand for relevant algorithms due to the changing actual working scenarios. As an important part of the autonomous motion of industrial robots, the solution method and efficiency of the spatial plane pose are directly related to the final motion accuracy of robots. In order to simplify the robot structure and improve the sensitivity of the whole system, the monocular vision system is adopted in this paper, which has a wider working range and a more compact structure. At present, the solution of the spatial plane pose can be divided into multi-point constraint problems and non-point constraint problem. The multi-point constraint problem usually involves the identification and pose settlement of multiple feature points, and its application often requires the use of a specific calibration board or the addition of multiple auxiliary feature objects, so the solution is complicated. The non-point constraint problem mainly solves the space pose of the plane by analyzing the characteristic circle. As a common basic feature in life, the circle appears widely on all kinds of workpiece. The research of the spatial plane pose algorithm based on the spatial circular feature is very important to improve the autonomous measurement and motion control of industrial robots. Because of camera perspective distortion, the image of the circle in the camera is not a standard ellipse, but a quasi-ellipse. There is no accurate basis for ignoring this perspective distortion to treat the projection of a circle as an ellipse. In this paper, by analyzing the variation of elliptic-like short diameter length in circle imaging, the ratio of object distance d to circle radius r is taken as the parameter to measure the distortion error of circle perspective, and its maximum value is taken as the precision value of each ratio of d to r , and the accuracy variation curve of perspective distortion is given. The traditional algorithms for solving spatial plane pose based on the characteristic circular target mainly involve the application at a long distance, and the solution shows duality, which often requires complex calculation. In this paper, considering perspective distortion, we mainly study the problem of using the feature circle to solve the position and pose of the space plane in a short distance. By using three points in the projection image of a feature circle to solve the relative position and pose of the target plane and the camera, we derive the algorithm of solving the relative position and pose. In order to verify the accuracy and actual effect of the algorithm, two comparison algorithms are added. By establishing an error analysis model, error simulation and experimental verification of the three algorithms are carried out respectively. The results show that the average accuracy of the algorithm can reach 0.1° when the ratio of object distance to feature circle radius is within 18 and the prime precision is $0.1\sim 1$ pixel, which is better than the other two algorithms in this paper.

Key words: Measurement; Machine vision; Spatial circular feature; Pose measurement; Perspective projection

OCIS Codes: 150.0155; 080.1753; 150.5758; 150.1135